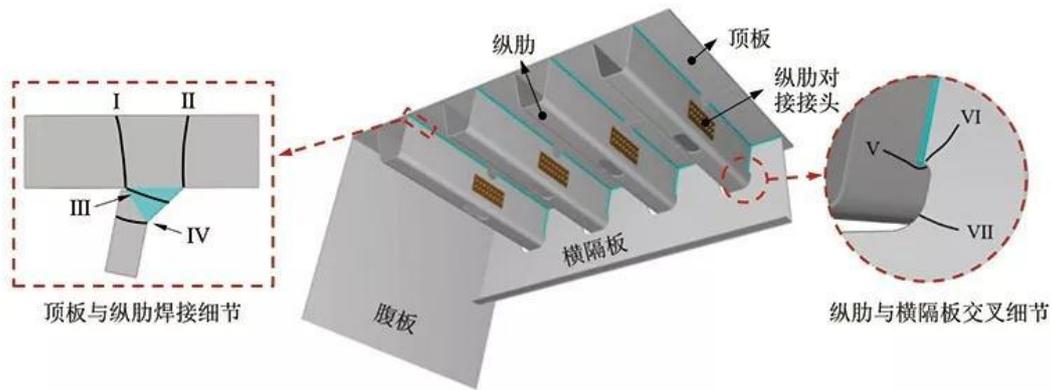


正交异性钢桥面板劳损的智能检测与检测体系

钢桥面板具有自重轻、承载力高、适用范围广、便于工厂化制造等突出优点,是大跨度桥梁的首选桥面板结构,在全世界范围内得到了广泛的应用。钢结构桥梁中钢桥面板兼具主梁结构的组成部分和桥面板结构两种功能;同时,为了在高强度和轻质两个矛盾的约束条件下找到合理的平衡,一般根据桥梁结构,对钢桥面板受力特性的实际需求,仅采用密布纵向加劲肋加劲顶板,而横向加劲肋的布置间距远较纵向加劲肋大,导致钢桥面板纵桥向和横桥向的局部刚度存在显著差异,因此钢桥面板又常被称为“正交异性钢桥面板”。

智能养护 途径与挑战

从 1971 年英国 Severn 桥钢桥面板出现疲劳开裂,工程界开始重视钢桥面板疲劳问题以来,对其疲劳问题的认识逐步深化,使钢桥面板的结构体系得以不断发展和优化。当前常用的钢桥面板主要采用闭口加劲肋,板件间主要通过焊接进行连接。尽管通过引入新的焊接技术、工艺和新的构造细节,使钢桥面板的疲劳抗力显著提高,但由于钢桥面板受力特性复杂、直接承受大量局部轮载的反复作用、结构涵盖多个应力集中问题突出的构造细节、焊接残余应力和初始制造缺陷难以避免等,其疲劳问题仍是阻碍钢结构桥梁可持续发展的关键技术难题之一。可以预期,如在提高桥面板结构体系疲劳抗力方面的实际进展速度,慢于“重载、高速、大流量”的现代交通对于钢桥面板疲劳抗力的需求发展速度,未来一段时期钢桥面板的疲劳问题可能会愈发突出。



- 失效模式I: 裂纹萌生于焊根沿顶板扩展
- 失效模式II: 裂纹萌生于焊趾沿顶板扩展
- 失效模式III: 裂纹萌生于焊根沿焊缝内部扩展
- 失效模式IV: 裂纹萌生于焊趾沿纵肋腹板扩展
- 失效模式V: 裂纹萌生于焊趾沿纵肋腹板扩展
- 失效模式VI: 裂纹萌生于焊趾沿横隔板扩展
- 失效模式VII: 裂纹萌生于横隔板弧形开孔沿横肋扩展

桥梁杂志

图 1 典型正交异性钢桥面板体系失效模式

最新的研究结果表明：钢桥面板的疲劳问题属于同时涵盖多个疲劳易损构造细节、且各构造细节均包含多个疲劳失效模式的结构体系可靠度问题，典型正交异性钢桥面板体系的失效模式如图 1 所示。目前钢桥面板的疲劳损伤监测仍主要采用传统的超声波、磁粉等传统人工检测技术。此类方法的主要问题包括：(1)检测效率低且漏检率高，无法满足钢结构桥梁快速巡检和高质量安全服役的要求；(2)巡检环境恶劣，尤其是夏季钢箱梁内高温高湿，工作条件恶劣，人工巡检困难且存在安全隐患；(3)维护成本高，需要耗费大量人工和时间成本。针对上述问题，相关学者提出了基于无人机技术和图像处理技术的桥梁裂纹检测方法。但该方法仅能检测表面裂纹，难以有效检出处于萌生期的微小疲劳裂纹。对于正交异性钢桥面板而言，其疲劳损伤危害最严重的构造细节，为直接承受轮载作用的顶板与纵肋焊接构造细节，该构造细节最常发生的疲劳开裂为失效模式 I——裂纹萌生于焊根并沿顶板扩展，如图 1 所示。该裂纹为萌生于纵肋内部的非表面隐蔽型裂纹，无法通过基于无人机技术的图像处理方法检出，通常只有在裂穿顶板，发

展成贯穿型长大裂纹，导致桥面铺装局部损坏时才能发现，此时加固极为困难且须中断交通，直接维护成本和间接经济损失较高。此外，当前无人机电池续航能力仍无法满足大跨度桥梁长距离巡检要求。因此，发展钢桥面板智能化监测方法和检测技术，建立智能化的疲劳损伤监测评估体系，是保障大跨度钢结构桥梁运营安全和服役质量、延长其使用寿命、促进其可持续发展的重要途径。

作为全新的研究方向，当前钢桥面板疲劳损伤监测面临的主要挑战包括：(1) 正交异性钢桥面板冗余度高，其结构刚度对局部疲劳裂纹不敏感，无法采用既有监测手段和损伤识别方法，判别焊接部位或隐蔽部位是否发生疲劳开裂；(2) 既有疲劳损伤评估方法均面向构造细节，无法基于结构体系的宏观监测数据，实现钢桥面板疲劳损伤的多尺度评估；(3) 接触式传感器仅能间接监测有限部位的疲劳损伤，理论上需在大跨度桥梁全域范围内各构造细节均布置接触式传感器，才能实现对于疲劳损伤的监测，但这在实际工程应用中很不现实。针对上述问题，采用系统性研究方法，以构造细节和结构体系的多尺度疲劳损伤评估理论为基础，结合智能化非接触式传感器进行区域性疲劳损伤监测。在此基础上，对正交异性钢桥面板疲劳损伤部位进行剩余寿命预测，根据预测结果确定损伤等级，并制定科学的维护策略。根据上述研究，内容建立钢桥面板疲劳损伤智能监测与检测体系，研发疲劳损伤实时监测可视化、远程化管理系统。该系统是钢结构桥梁智能化运维过程管理系统的重要组成部分。

智能监测与检测体系的建立

系统深入的统计分析、试验和理论研究均表明：钢结构桥梁的疲劳抗力,由具有多疲劳破坏模式特性、疲劳抗力存在显著差异的多个构造细节共同决定,其疲劳问题属于典型的构造细节与结构体系多尺度问题,针对单一构造细节的监测手段,无法准确评判正交异性钢桥面板的损伤状态。为准确确定大跨度桥梁结构钢桥面板当前时刻的疲劳损伤状态,需首先对研究对象进行模型更新;进而基于多尺度疲劳损伤评估方法和荷载监测数据。对目标结构进行疲劳损伤评估和预后;根据预后结果,有针对性地对可能的疲劳易损部位进行进一步的重点监测和检测,并实现智能化、可视化、远程化管理。西南交通大学高性能桥梁新结构与新材料研究团队(后文简称“研究团队”)为建立钢桥面板疲劳损伤的智能监测与检测体系,对体系中的各关键问题进行了大量的探索性研究,以下内容为主要研究进展。

大跨度桥梁模型修正

实际结构监测时,无论测点布置多么密集,都难以实现对于所有构造细节和疲劳失效模式的全覆盖,将理论分析与实测数据有机融合是唯一的可行途径。因此,结合有限实测数据对有限元模型修正,发展能够建立外荷载激励与结构响应映射关系的虚拟模型,通过虚拟模型实现结构体系全域响应的精确预测。研究团队采用响应面法,建立了大跨度复杂桥梁结构响应与结构设计参数间的精确映射关系,并结合确定的优化模型,采用遗传算法对结构参数进行更新,能够实现大跨度复杂

钢结构桥梁的高效率实时模型修正。作为结构疲劳损伤评估的重要依据，其实现过程如图 2 所示。

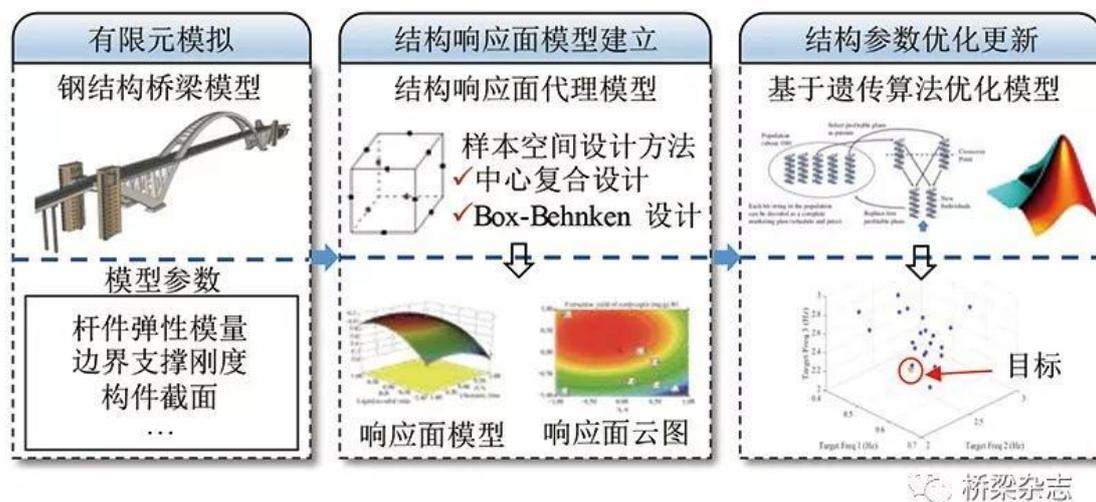


图 2 大跨度桥梁结构模型修正

多尺度疲劳损伤评估方法

区别于仅关注构造细节疲劳抗力的传统方法，从涵盖构造细节和结构体系的多尺度角度出发，准确确定结构体系疲劳损伤控制部位和疲劳失效模式，进而实现结构实际疲劳抗力的准确评估。以面向构造细节的疲劳损伤评估方法为基础，考虑关键影响因素的不确定性和多因素耦合影响条件下的疲劳失效模式迁移问题，并结合所建立的结构响应代理模型，实现钢结构桥梁全域范围的整体与局部多尺度疲劳损伤可靠度的实时动态评估。研究团队基于实际监测的车辆荷载数据所确定的某典型大跨度斜拉桥钢桥面板的实时疲劳损伤分布如图 3 所示。

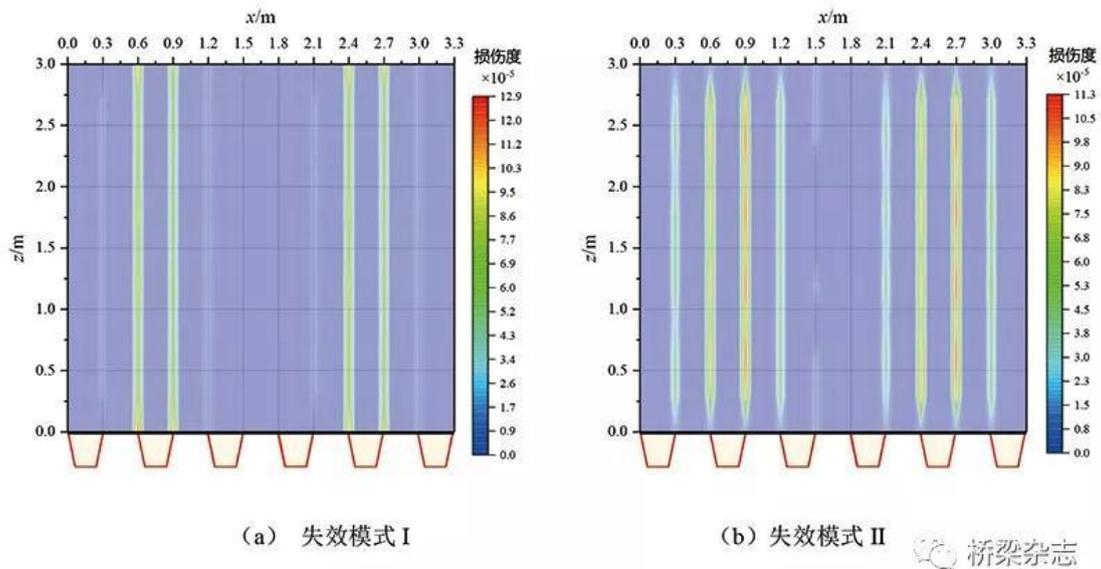
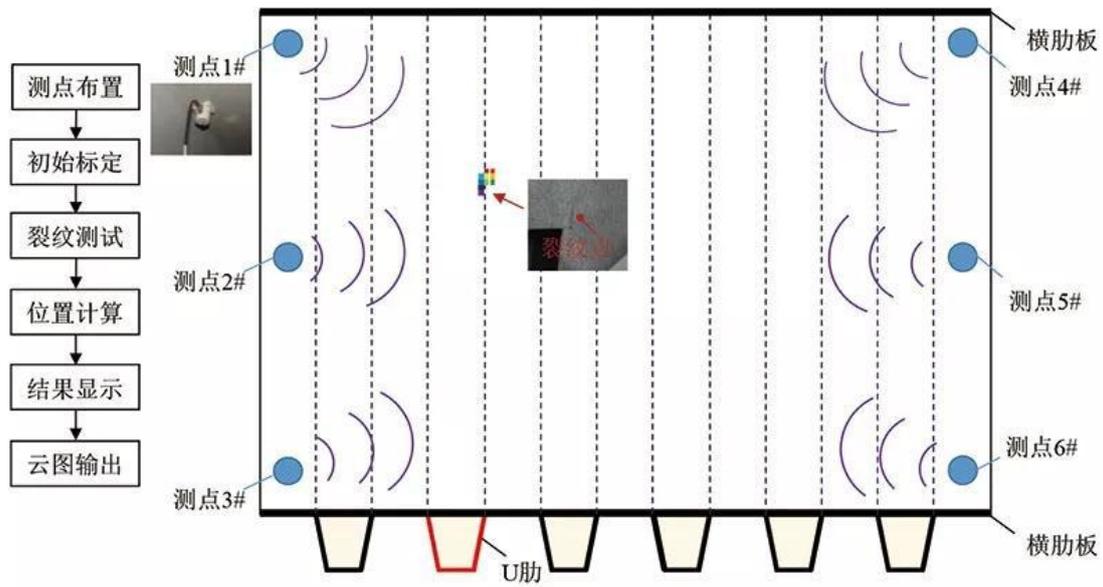


图 3 典型桥梁钢桥面板关键构造细节的实时疲劳损伤分布

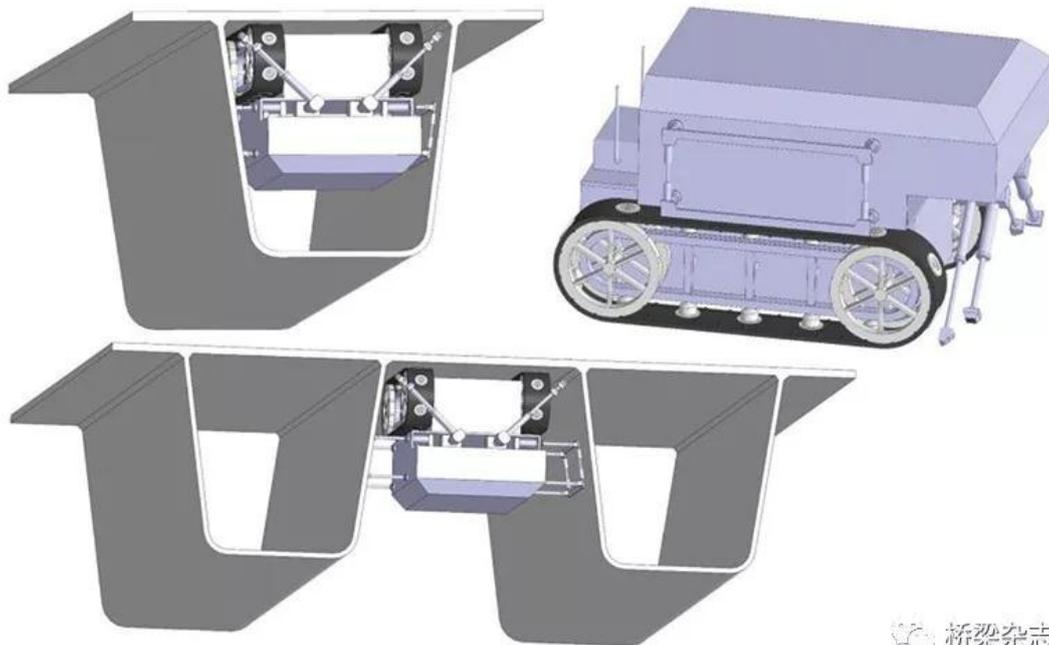
智能化监测与检测技术

多尺度疲劳损伤评估结果，对于疲劳损伤监测与检测具有重要指导意义。以理论分析结果为指导，研发智能化无损监测与检测技术，对于可能的疲劳损伤部位进行重点监测与检测，并通过多源信息融合实现疲劳损伤的高精度监测，有效避免漏检。为此，研究团队对于疲劳开裂的非接触式智能化监测与检测技术进行了深入研究，当前采用超声相控阵和导波等非接触式声发设备，与传统的应力及变形传感器相结合的方式，编制了智能化疲劳裂纹判别程序，并研发了根据判别结果采用智能机器人二次确认技术。模型试验和实际工程应用均表明：所研发的技术能够精准确定裂纹萌生部位，并实现多源信息条件下的疲劳损伤智能监测与检测，如图 4 所示。研究团队所研发的钢桥面板专用多源检测机器人如图 5 所示。



桥梁杂志

图 4 智能化钢桥面板疲劳损伤无损检测与监测技术



桥梁杂志

图 5 研发团队研发的钢桥面板专用多源检测机器人

基于人工智能的剩余疲劳寿命预测

以所研发的智能化监测与检测技术作为裂纹实时监测手段,根据实时动态损伤评估结果,对钢桥面板的重要疲劳易损部位进行实时监测,该技术可为确定疲劳裂纹源及特征提供导向性信息。在此基础上,结合无人机对定位的裂纹源进行二次确认及拍照,并结合图像处理技术,从包含钢结构边界阴影及大量噪声的三维图像中,提取裂纹的二维或一维特征信息。基于研究团队所提出的多尺度疲劳裂纹三维扩展过程模拟程序,结合图像处理后的裂纹归一化信息和实际交通荷载监测信息,对钢桥面板的剩余疲劳寿命进行预测,当前模拟程序和剩余疲劳寿命预测结果,已通过多个模型试验进行了验证。在此基础上,基于有限元裂纹扩展仿真模拟,得到初始裂纹参数与剩余寿命之间的映射关系,建立两者的映射关系数据库,采用基于神经网络的方法,对数据库中的泛化规律进行深度学习,即可实现对裂纹剩余疲劳寿命的预测。如图 6 所示。当前研究团队已基于智能化图像处理技术,建立了基于神经网络深度学习的快速剩余疲劳寿命预测方法。

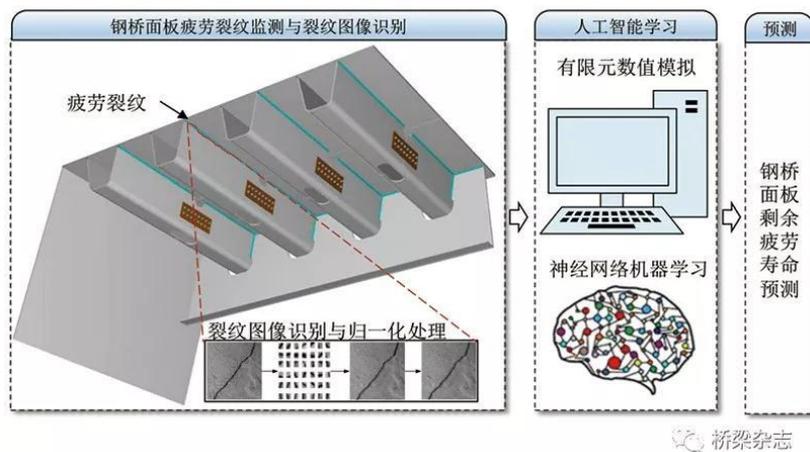


图 6 基于人工智能的钢桥面板剩余疲劳寿命预测

智能化监测与检测系统的建立

疲劳损伤预后技术是实现智能监测与检测系统的重要前提，也是制定科学合理的维护决策的重要依据。结合智能化传感器和网络云端数据处理技术，引入基于数据驱动和人工智能数据挖掘的新方法，对多尺度物理模型实时修正与更新，考虑外部环境的不确定性，通过人工智能算法对历史数据进行机器学习，对未来不确定性损伤状态进行预测，对可能出现的疲劳损伤提前进行智能化人工干预，并基于预测结果制定科学、合理、适用的管理维护策略。研究团队对钢桥面板疲劳损伤智能监测与检测体系进行了深入研究，初步建立了钢桥面板疲劳损伤智能监测与评估体系，并根据建立的钢桥面板疲劳损伤智能监测与评估体系研发了钢桥面板疲劳损伤智能化监测与评估软件，如图 7 所示。

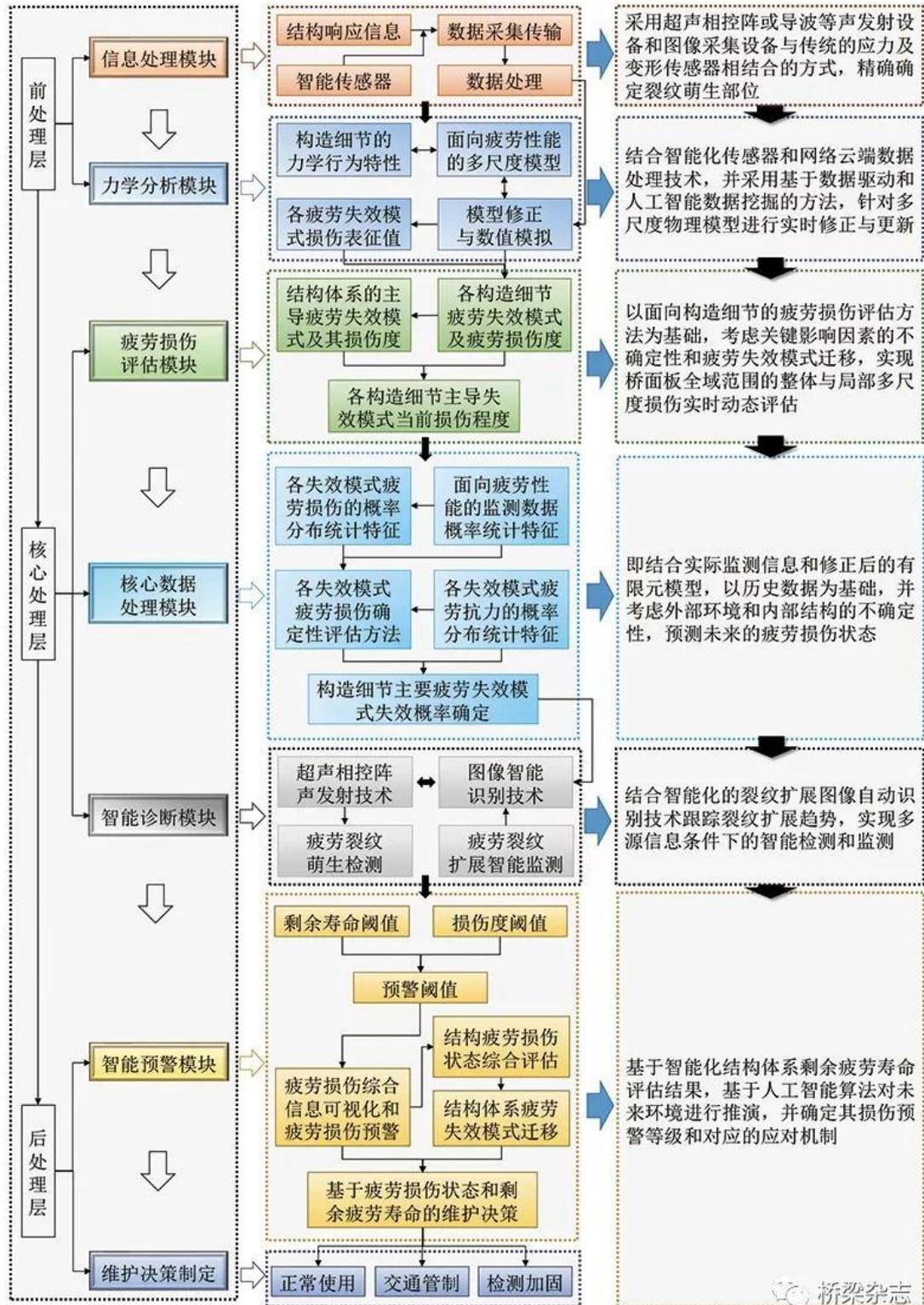


图 7 钢桥面板疲劳损伤智能化监测与检测系统的建立

当前面临的主要挑战

研究团队对钢桥面板疲劳损伤智能监测与检测系统进行的研究表明,所提出的模型更新方法、多尺度疲劳损伤评估方法、智能化监测与检测方法、基于人工智能的剩余寿命评估方法,可为钢桥面板疲劳损伤智能监测提供有力支撑。但作为多学科交叉的全新研究领域,当前钢桥面板疲劳损伤智能监测与检测系统及其关键技术,仍面临多方面的挑战,有待进一步深入研究并逐步完善。

大跨度复杂桥梁结构的高效模型更新方法

采用数值模拟类方法,对大跨度复杂桥梁结构进行模型更新时,计算效率较低,尤其是当更新参数数量增加后,其计算效率显著下降,导致实时模型更新较为困难。此外,由钢桥面板的构造特性所决定,其过高的冗余度使局部刚度退化更新困难。为准确确定钢桥面板的当前受力状态,需进一步对钢桥面板的局部构造参数更新方法进行研究。随着云计算的发展和计算机核心处理器计算效率的提高,基于云计算的多服务器并行计算方法,有望解决钢桥面板多参数更新效率低下的难题。采用多服务器并行的群计算,进行大跨度桥梁结构参数和局部参数的多尺度更新方法,有待进一步深入研究。

高精度智能化监测与检测新技术

采用基于超声相控阵或导波等非接触式声发射传感器时，需对裂纹构件进行初始标定，以确定超声测试裂纹所用波长的合理区间。此外，在实际结构中进行测试时，由于车致振动引起的测试噪声较大，可能导致测试结果被测试噪声所淹没。如何在不中断交通的条件下有效屏蔽干扰信号，或采用后期智能化处理方法对测试结果进行降噪处理，也有待进一步深入研究。

钢桥面板疲劳损伤预警方法与指标

采用智能化监测技术可有效监测疲劳裂纹的萌生和扩展。但桥梁结构实际服役条件复杂，从多源信息中甄别有效评判信息，制定钢桥面板疲劳损伤预警阈值，研发智能化钢桥面板疲劳损伤预警系统，是保障车辆行驶安全、降低维护费用和时间成本的有效途径。因此，制定钢桥面板疲劳损伤预警机制及损伤等级，并集成到智能化监测与检测系统，是下一步的研究重点。

基于人工智能的剩余寿命预测方法

在监测到疲劳裂纹后，可采用基于人工智能的剩余寿命预测方法，快速预计其剩余寿命，根据剩余寿命制定科学合理的维护策略。基于人工智能的剩余寿命预测方法，需对监测到的裂纹进行图像识别。因钢桥面板的疲劳裂纹属于三维裂纹，而基于图像处理的方法仅可获得表面裂纹的形态特性，仅依据表面裂纹的

形态特性将降低数值模拟分析的准确性，对准确建立初始裂纹特征参数与剩余寿命间的映射关系,有显著不良影响。同时，在采用基于人工智能的方法,对初始裂纹特征参数与剩余寿命间的映射关系的泛化规律进行机器学习时，如何保证其“鲁棒性”，以提高预测精度仍需进一步深入研究。发展多模式荷载作用、加工制造缺陷、焊接残余应力等多因素耦合影响条件下，结构系统疲劳抗力可靠度与剩余寿命预测方法，是未来的重要研究方向。

以多尺度疲劳损伤评估方法、智能化无损检测理论、图像快速处理、有限元数值模拟、机器学习等多学科交叉为基础的钢桥面板疲劳损伤智能化监测与检测体系，需将各关键子系统有效协同。而效率和精度这对矛盾体，则是钢桥面板疲劳损伤智能监测与检测的关键研究课题。

研究团队针对钢桥面板疲劳损伤的智能监测与检测问题，结合智能技术的最新发展和正交异性钢桥面板疲劳问题的基本属性，以正交异性钢桥面板疲劳问题的基本属性和智能监测与评估问题为导向，构建了其疲劳损伤智能监测与检测系统，并对大跨度桥梁模型更新、体系疲劳损伤评估、智能化的监测技术和剩余寿命评估方法等相关关键问题进行了探索性研究。

本文作为正交异性钢桥面板体系疲劳裂纹监测与检测体系方向的起步工作，涉及多个学科领域，所涉及的各项研究工作仍需不断深化。如大跨度复杂桥梁结构的高效模型更新方法、高精度智能化监测与检测新技术、钢桥面板疲劳损伤预警方法与指标、基于人工智能的剩余寿命预测方法、多因素耦合影响条件下

结构系统疲劳抗力可靠度与剩余寿命预测方法、基于疲劳损伤预后的智能管理维护决策等，是下一阶段的研究重点。